

НЕОБХОДИМОЕ И ДОСТАТОЧНОЕ УСЛОВИЯ КАЧЕНИЯ ЗАДНЕЙ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ В РАДИАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ И БЕЗ СКОЛЬЖЕНИЯ ЕЕ КОЛЕС В КРИВЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ

В результате исследования получено необходимое условие качения в радиальной установке задней колесной пары тележки с жесткой рамой. Показана невозможность такого качения во всех кривых с радиусами менее 1250 м при устройстве пути по существующим нормам и конусностью поверхности катания колес 1/10. Движение тележки в таких кривых осуществляется только в хордовой установке.

Ключевые слова: качение, сопротивление, колесо, гребень, рельс, кривая, скольжение, условия, радиус

EDN: RDPYPW



Е.П. Корольков



А.И. Бондаренко

Задача уменьшения энергозатрат на движение железнодорожного подвижного состава всегда остается актуальной для специалистов по подвижному составу и тяге поездов. Известно, что в силу набегания колес колесных пар (КП) на внешний рельс в кривых возникают дополнительные силы трения скольжения, на преодоление которых требуются дополнительные затраты энергии.

Ясно, что чем меньше элементов тележки, взаимодействуя, скользят, тем меньше сопротивление движению подвижного состава. В частности, колеса КП в тележке с жесткой рамой, катаясь по рельсам, постоянно подкальзывают, не имея возможности удовлетворять условиям качения без скольжения, особенно двигаясь в кривых участках пути.

В настоящей работе исследуются необходимые и достаточные условия качения колес в радиальной установке и без проскальзывания задней КП тележки с жесткой рамой. Профиль поверхности катания колес принят соответствующим п. 5.2 ГОСТ 10791-2011 «Колеса цельнокатанные. Технические условия».

Наибольшее проскальзывание возникает при качении колес КП в кривых участках пути, когда по внешнему рельсу КП должна пройти больший путь, чем по внутреннему [1]. Проскальзывание колес возрастает с уменьшением радиуса кривой. Причем проскальзывают не только набегающие КП тележек, но и вторые по ходу движения [2;3]. Следует также заметить, что скольжение колес происходит и в кривых с возвышением наружного рельса, несмотря на компенсацию

Корольков Евгений Павлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Высшая математика» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамика подвижного состава железнодорожного транспорта, математическое моделирование динамических систем. Автор более 90 научных работ. Имеет один патент на изобретение.

Бондаренко Анатолий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: проблемы износа гребней колес и рельсов, подвижной состав железных дорог. Автор более 50 научных работ.

Корниенко Нина Амосовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Высшая математика» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамика подвижного состава, методика преподавания математических дисциплин. Автор 35 научных работ.

Колокольчикова Любовь Владиславовна, аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамика подвижного состава железных дорог. Автор девяти научных работ.

центробежной силы, о чем свидетельствует износ поверхностей гребней колес и рельсов. Силовой контакт гребней с рельсами требует дополнительного расхода энергии на преодоление сил сопротивления, возникающих в контакте гребня и боковой поверхности рельса.

Двигаясь в кривых участках пути, двухосные тележки в жесткой раме устанавливаются так, что задняя по ходу движения КП заняла радиальное положение. Установлено, что колеса такой КП будут катиться без проскальзывания, если в пределах зазора между гребнями колес и боковыми поверхностями рельсов выполняется условие:

$$\frac{R+h}{R-h} = \frac{r_0 + \Delta r_1}{r_0 + \Delta r_2}, \quad (1)$$

где R — радиус кривой; h — половина расстояния между кругами катания колес КП; r_0 — радиус круга катания в центральной установке; Δr_1 , Δr_2 — приращение радиусов катания соответственно наружного и внутреннего колес при поперечном перемещении центра масс КП.

Условие (1) является необходимым и достаточным условием качения колесной пары без скольжения его колес по рельсам и достаточным для качения задней колесной пары (ЗКП) в радиальной установке.

Однако, как будет показано ниже, оно не является необходимым для занятия задней колесной парой радиального положения.

Расстояние между кругами катания колес и радиус катания колес в центральной установке тележки с жесткой рамой являются постоянными величинами для вагонных колес. Радиус кривой и приращения радиусов — переменные величины, причем последние зависят от поперечного перемещения « y » КП и формы поверхности катания колеса.

Если ЗКП по ходу движения стремится занять радиальное положение, то гребень ее внешнего колеса будет иметь некоторый зазор Δ с боковой гранью рельса. Тогда качение задней колесной пары без проскальзывания колес будет возможным при условии равенства зазора $\delta - \Delta$ (2δ — суммарный зазор между гребнями колес и рельсами) и величины « y » отношения пары необходимого для такого качения:

$$\delta - \Delta = y. \quad (2)$$

Это условие является необходимым для движения ЗКП в радиальной установке.

Выясним, выполняется ли необходимое условие (2) для кривых устроенных по существующим нормам, в которых зазор на одну сторону равен 6 мм в кривых радиуса не менее 350 м, а величина зазора Δ

в радиальной установке может быть подсчитана по формуле

$$\Delta \cong \frac{2l^2}{R+h}.$$

где l — половина расстояния между колесными парами в тележке.

Проведенные расчеты по формулам (1) и (2) и сравнительный анализ показали — ЗКП вагонных тележек с жесткой базой, поверхности катания колес которых имеют коническую поверхность с конусностью $2i = 1/10$, не удовлетворяют необходимым и достаточным условиям качения КП в радиальной установке в кривых радиуса менее 1250 м.

Следовательно, в кривых радиуса от 350 м до 1250 м тележка с жесткой рамой будет двигаться в хордовой установке. При этом внутренние колеса колесных пар будут катиться с пробуксовкой, внешние колеса будут касаться гребнями боковой поверхности внешнего рельса.

В кривых радиуса более 1250 м ЗКП двухосной тележки может занять радиальное положение. Однако, если не выполняется условие (1), которое является необходимым и достаточным для качения колес ЗКП без скольжения, внутреннее колесо будет подскальзывать, создавая дополнительное сопротивление движению.

Выясним, существуют ли кривые $R > 1250$ м, в которых задняя колесная пара катится без скольжения. Для этого рассмотрим две функции:

$$\Omega_1 = 1 - \frac{2kh}{1+kh}. \quad (3)$$

Здесь $k = 1/R$, причем $0 \leq k < 0,0008$, так как радиус кривых меняется от бесконечности (прямой участок) до кривой радиуса 1250 м. В этом интервале возможна радиальная установка ЗКП двухосной тележки с жесткой базой

$$\Omega_2 = 1 - \frac{2iy}{r_0 + iy}. \quad (4)$$

Формула (4) определена на множестве значений поперечного отклонения ЗКП от $0 \leq y \leq 0,006$ м, $i = 1/20$, $r_0 = 0,475$ м.

Функции (3) и (4) являются безразмерными и значения радиусов кривых и отклонений ЗКП могут принадлежать множеству пересечения значений функций (3) и (4).

Если же пересечения не существует, то это означает, что во всех кривых ЗКП вагонов будет катиться с подскальзыванием ее внутреннего колеса.

Найдем области значений функций Ω_1 , Ω_2 . Будем считать $2h=1,52$ м и, тогда, для вышеуказанных значений получим:

$$0,99878 \leq \Omega_1 \leq 1, \quad (5)$$

$$0,99987 \leq \Omega_2 \leq 1. \quad (6)$$

Нетрудно видеть, что множество значений функции Ω_2 вложено в множество значений функции Ω_1 . Установим значение радиуса кривой, при котором $\Omega_1=0,99987$. Оказалось, что этому значению отвечает кривая с радиусом $R=11691$ м.

Следовательно, во всех кривых с радиусами меньше $R=11691$ м ЗКП двухосной тележки с жесткой базой будет катиться внешним колесом и подскользывать внутренним, если путь имеет колею шириной 1520 мм и поверхность катания колес диаметром 950 мм имеет коническую поверхность $2i=1/10$.

В кривых же радиуса большего $R=11691$ м возможно качение задней колесной пары без скольжения ее колес по рельсам. Но в этом случае возникает вопрос в кривых какого радиуса большего 11691 м задняя колесная пара будет катиться без проскальзывания колес. Для ответа на этот вопрос преобразуем функции Ω_1 и Ω_2

$$\Omega_1(R) = 1 - \frac{2h}{R+h} \approx 1 - \frac{2h}{R}, \quad (7)$$

$$\Omega_2(y) = 1 - \frac{2iy}{r_0 + iy} \approx 1 - \frac{2iy}{r_0} \quad (8)$$

в силу $h \ll R$ и $iy \ll r_0$.

Если вычислить производные этих функций, то можно видеть, что первая будет всюду монотонно возрастать, а вторая — убывать и они могут пересечься только в одной точке. Поэтому ЗКП при вышеизложенных значениях параметров пути и поверхности катания колеса будет подскользывать внутренним колесом по рельсу практически во всех кривых.

Выясним влияние параметров функций Ω_1 и Ω_2 на нижние границы их значений.

Из формулы (7) видно — с уменьшением ширины колеи множество значений функции Ω_1 сужается, т.е. нижняя граница множества увеличивается. Как видно из формулы (8) с увеличением конусности поверхности катания колес и уменьшением радиуса колеса множество значений функции Ω_2 расширяется — значение

нижней границы уменьшается. Это, в свою очередь, ведет к увеличению числа кривых, в которых возможно качение задней КП без проскальзывания.

Проведенные исследования могут быть полезны при проектировании поверхности катания колес, особенно при проектировании тележек с радиальной установкой колесных пар и при проектировании экипажей высокоскоростного транспорта, исследуя взаимодействие подвижного состава и пути.

Итак, проведенные исследования движения в кривых двухосной тележки с жесткой базой позволили:

- вывести необходимое условие установки задней колесной пары в радиальное положение;
- показать, что в кривых радиусом от 350 м до 1250 м радиальная установка невозможна и тележка движется в хордовой установке;
- радиальная установка ЗКП возможна в кривых радиуса более 1250 м;
- показать, что движение тележки без скольжения ее колес по рельсам возможно в кривых радиуса не меньше 11691 м;
- доказать, что такая кривая будет единственной.

Литература

1. Осипов, С. И. Основы тяги поездов / С. И. Осипов, С. С. Осипов : учебник для студентов техникумов и колледжей железнодорожного транспорта. - Москва : УМК МПС России, 2000. - 592 с. - Текст : непосредственный.
2. Жуковский, Н. Е. Теория прибора инженера Ромейко - Гурко / Н. Е. Жуковский // Собрание сочинений. - Москва - Ленинград: Госиздат. - 1949. - Т.3. - С. 329-333. - Текст : непосредственный.
3. Корольков, Е. П. Условия скольжения колес колесной пары, заключенной в жесткую раму / Е. П. Корольков, А. И. Бондаренко. - Текст : непосредственный // Вычислительная механика деформируемого тела : материалы Международной научно-технической конференции. - Москва : МИИТ, 2006.